

органические кислоты, легко биологически окисляемые в окружающей водной среде и на сооружениях биологической очистки. Это имеет большое значение для совершенствования технологии очистки сточных вод методом озонирования.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика / Н.И. Лихачев [и др.]; под общ. ред. В.Н. Самохина. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.
2. Житенев, Б.Н. Спектрометрические исследования влияния дозы озона на степень деструкции красителей в водных растворах / Б.Н. Житенев, С.Г. Белов, Г.О. Наумчик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 26–32.

3. Житенев, Б.Н. Инструментальный метод определения интенсивности окраски сточных вод / Б.Н. Житенев, С.Г. Белов, Г.О. Наумчик // Интенсивность окраски сточных вод. Научно-технические проблемы водохозяйственного и энергетического комплекса в современных условиях Беларуси: сборник материалов международной научно-практической конференции, Брест 21–23 сент. 2011 г.: в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: П.П. Пойта [и др.]. – Брест, 2011. – Ч. 1 – С. 68–72.
4. Бершгейн, И.Я. Спектрометрический анализ в органической химии / И.Я. Бершгейн, Ю.Л. Каминский. – Л.: Химия, 1986. – 199 с.
5. Разумовский, С.Д. Озон и его реакции с органическими соединениями / С.Д. Разумовский, Г.Е. Заиков. – М.: Наука, 1974. – 324 с.

Материал поступил в редакцию 13.05.13

**BELOV S.G., NAUMCHIK G.O. Finding out the depth of destruction of organic compounds by method of UV-spectrometry**

The article pays much attention to the problems of identification of separate classes of organic compounds in water solutions by method of UV-spectrometry. The usage of this method will allow to simplify considerably finding out the optimum ozone doze while natural waters and sewage being ozoned. The carried out research shows that it is possible, as ozone destroys complicated organic substances first of all, which turn into simple aliphatic oxy compounds. The article gives spectra of organic compounds and of their destruction after interaction with ozone. Besides, one can also find here spectra of simple aliphatic oxy compounds, mainly organic acids in different concentrations. It is stated that organic acids are satisfactorily identified in concentrations from 1 to 30 mg/l, but it depends on chemical structure.

УДК 662.812:628.33

Санюкевич Ф.М.

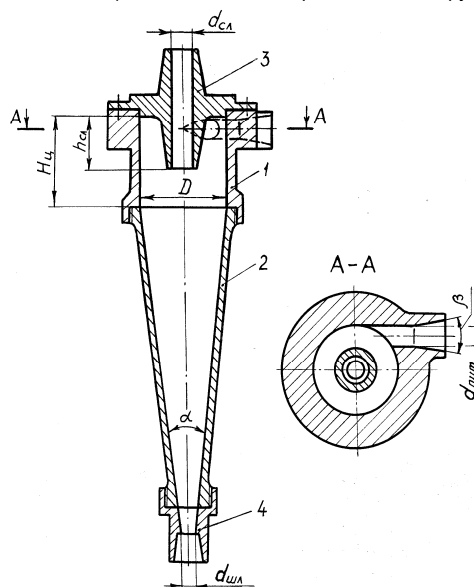
**НАПОРНЫЕ МИКРОЦИКЛОНЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**Введение.** Одним из наиболее эффективных устройств, использующих действие центробежных полей для сепарации различных компонентов жидкости, являются напорные гидроциклонные аппараты [1-5]. Особенно эффективны гидроциклоны малых диаметров, называемые микроциклонами. С целью обработки больших объемов жидкостей микроциклоны komponуют в мультициклонные блоки с общими камерами питания, слива и шлама.

В общем случае единичный напорный гидроциклон (рис. 1) состоит из цилиндрической части, к которой снизу примыкает своим большим основанием конус 2 с углом конусности  $\alpha$ . Для подачи исходной жидкости под избыточным давлением в гидроциклон служит питающий патрубок, выполненный строго по касательной к внутренней поверхности цилиндрической части 1. Такое конструктивное исполнение патрубка обеспечивает создание и постоянную поддержку вращательного движения жидкости, что приводит в свою очередь к появлению центробежной силы, необходимой для разделения исходной двух- или многокомпонентной системы. Осветленная жидкость (слив или легкий компонент) отводится через сливной патрубок 3. Отвод сгущенного шлама (тяжелого компонента) осуществляется через сменные насадки 4. С целью исключения попадания исходной жидкости в осветленный продукт нижнее основание сливного патрубка должно располагаться ниже питающего отверстия. Снижение турбулентности потока жидкости в питающем патрубке в момент ее входа в аппарат обеспечивается его начальной конической частью с углом  $\beta=20...35^\circ$ .

Поступающая через питающий патрубок под давлением во внутреннюю часть циклона исходная жидкость приобретает в нем вращательное движение. Под действием возникающих значительных центробежных сил твердая фаза (компонент) жидкости движется во внешнем нисходящем потоке 1 (рис. 2) от оси гидроциклона к его стенке по спиральной траектории вниз и выводится из аппарата через шламовую насадку. Осветленная жидкость движется во внутреннем восходящем потоке 2 по спиральной траектории вверх и выводится через сливной патрубок. Внутренний восходящий поток 2 начинается в нижней части конуса вблизи шламового отверстия и

движется вверх, вращаясь в том же направлении, что и нисходящий поток 1. Таким образом, внешний поток 1, подходя к шламовой насадке, делится на нижнюю часть, которая, не изменяя направления поступательного движения, уходит через шламовую насадку, и верхнюю, которая образует восходящий поток, изменяя направление поступательного движения. Вблизи оси циклона центробежная сила становится настолько большой, что жидкость разрывается, образуя вихревой шнур, имеющий вид воздушного столба 3 (рис. 2) с диаметром, составляющим 50...60% диаметра сливного патрубка.

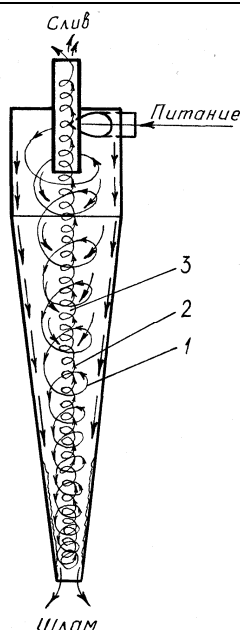


1 – цилиндрическая часть; 2 – коническая часть; 3 – сливной патрубок; 4 – шламовая насадка

Рис. 1. Единичный напорный гидроциклон

Санюкевич Федор Михайлович, к.т.н., профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



1 – внешний нисходящий поток; 2 – внутренний восходящий поток; 3 – вихревой шнур

Рис. 2. Схема движения потоков жидкости в напорном гидроциклоне

**1. Теоретические предпосылки сепарации твердой фазы жидкости в центробежном поле циклонного аппарата.** При расчетах процесса сепарации различных материалов в криволинейном потоке микроциклона возникает много трудностей в случае учёта всех сложных явлений, проявляющихся при движении контактной среды, которая состоит из твёрдых частиц, находящихся во взвешенном состоянии и образующих вместе с разделяющей их жидкостью гетерофазную систему. С целью упрощения расчётов теория сепарации обычно абстрагируется от наличия системы и рассматривает движение изолированных частиц, представляющих собой идеальные сферы, диаметры которых определяются как среднее между наибольшим и наименьшим размерами частиц. При этом исключаются электрические силы, тепловые и силы трения частиц о стенки аппарата. Весьма незначительное влияние на характер движения частиц в условиях высокотурбулентного закрученного потока оказывают гравитационные силы. По сравнению с силами инерции они столь малы, что действием их обычно пренебрегают.

В качестве основных сил, действующих на взвешенную частицу, принимаем центробежную силу, выталкивающую силу, направленную к оси микроциклона и силу сопротивления жидкости. Если известны скорости движения частицы  $\bar{U}$  в принятой системе координат и движения жидкости  $\bar{V}$  в точке, где находится частица, то скорость сепарации  $\bar{U}_c = \bar{U} - \bar{V}$ . При этом число Рейнольдса по частице:

$$Re = \frac{U_c d_c \rho_{ж}}{\mu}, \quad (1)$$

где  $d_c$  – диаметр частицы;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости.

Движение частицы в криволинейном канале микроциклона наиболее удобно рассматривать в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ , где положение её будет определяться функциями  $r(t), \varphi(t), z(t)$  (здесь  $t$  – время). Ось  $z$  в данном случае совпадает с осью симметрии микроциклона, и за положительное её направление принимаем направление движения от сливного патрубка к нижней шламовой насадке (при установке аппарата шламовым отверстием вниз).

Радиус-вектор частицы относительно точки пересечения оси микроциклона с плоскостью, проходящей через ось питающего патрубка [1]:

$$\bar{\rho} = r(\bar{i} \cos \varphi + \bar{j} \sin \varphi) + z\bar{k}, \quad (2)$$

где  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  – орты;  $r$  – текущий радиус.

Для определения скорости движения частицы в принятой системе координат дифференцируем выражение (2) по  $t$ :

$$\begin{aligned} \bar{U} = & (\bar{i} \cos \varphi + \bar{j} \sin \varphi) \frac{dr}{dt} + \\ & + (-\bar{i} \sin \varphi + \bar{j} \cos \varphi) r \frac{d\varphi}{dt} + \frac{dz}{dt} \bar{k}. \end{aligned} \quad (3)$$

Радиальная, тангенциальная и аксиальная составляющие скорости движения частицы соответственно равны:

$$U_r = \frac{dr}{dt}, \quad U_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}, \quad U_z = \frac{dz}{dt}. \quad (4)$$

Ускорение частицы:

$$\begin{aligned} \bar{a} = & (\bar{i} \cos \varphi + \bar{j} \sin \varphi) \left[ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] + \\ & + (-\bar{i} \sin \varphi + \bar{j} \cos \varphi) \left( r \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \right) + \frac{d^2 z}{dt^2} \bar{k}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда проекции  $\bar{a}$  на оси координат:

$$\begin{aligned} a_r = & \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2, \quad a_\varphi = r \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt}, \\ a_z = & \frac{d^2 z}{dt^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Приняв  $\frac{dr}{dt} = \lambda, \frac{d\varphi}{dt} = \psi, \frac{dz}{dt} = \gamma$  и с учётом движения ча-

стицы в криволинейном канале микроциклона согласно закону Ньютона получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{d\lambda}{dt} = r\psi^2 + \frac{2\rho_{ч} - \rho_{ж}}{2\rho_{ч} + \rho_{ж}} \frac{V_\phi^2}{r} - \frac{12c\rho_{ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_c^a}{\pi d_c^3(2\rho_{ч} + \rho_{ж})} \times \\ \times \left[ \sqrt{(\lambda - V_r - V_{в.п.})^2 + (r\psi - V_\phi)^2 + (\gamma - V_z)^2} \right]^{a-1} \times \\ \times (\lambda - V_r - V_{в.п.}); \\ \frac{d\psi}{dt} = -\frac{1}{r} \left\{ \frac{12c\rho_{ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_c^a}{\pi d_c^3(2\rho_{ч} + \rho_{ж})} \times \right. \\ \times \left[ \sqrt{(\lambda - V_r - V_{в.п.})^2 + (r\psi - V_\phi)^2 + (\gamma - V_z)^2} \right]^{a-1} \times \\ \times (r\psi - V_\phi) + 2\lambda\psi \left. \right\}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = -\frac{12c\rho_{ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_c^a}{\pi d_c^3(2\rho_{ч} + \rho_{ж})} \times \\ \times \left[ \sqrt{(\lambda - V_r - V_{в.п.})^2 + (r\psi - V_\phi)^2 + (\gamma - V_z)^2} \right]^{a-1} \times \\ \times (\gamma - V_z), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\rho_{ч}$  – плотность частицы;  $c$  – коэффициент сопротивления, являющийся функцией числа Рейнольдса по частице;  $a$  – показатель степени, зависящий от характера движения частицы и изменяющийся

ся в пределах от 1 до 2 [2]: при  $R_e < 1$   $c=3$ ,  $a=1$  (сопротивление по Стоксу), при  $1 \leq R_e \leq 400$   $c=\sqrt{3}$ ,  $a=1,5$  (сопротивление в переходной области кривой Релея), при  $R_e > 400$   $c=1/8$ ,  $a=2$  (сопротивление по Ньютону).

Значения радиальной  $V_r$ , тангенциальной  $V_\phi$  и аксиальной  $V_z$  составляющих скорости потока жидкости, а также скорость взаимного перемещения взвешенных частиц  $V_{в.п.}$ , фигурирующие в системе уравнений (7), рекомендуется определять по формулам:

$$V_r = \frac{Qtg\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2400r\pi\left[3tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)(H_{ц} - h_{сл}) + D - d_{шл}\right]}; \quad (8)$$

на участке  $0,8 r_{сл} \leq r \leq D/2$

$$V_\phi = \frac{Q(0,5D)^n}{957,45\pi d_{сл}^{0,5} d_{пит}^{1,5} r^n}; \quad (9)$$

на участке  $0,6 r_{сл} \leq r < 0,8 r_{сл}$

$$V_\phi = \frac{Q(0,5D)^n r}{957,45(0,4)^{n+1} \pi d_{пит}^{1,5} d_{сл}^{n+1,5}}; \quad (10)$$

$$V_z = \frac{Q}{3000\pi d_{пит}^2} \left[1 - 0,8\sqrt[3]{\left(\frac{0,5D}{r}\right)^2}\right]; \quad (11)$$

$$V_{в.п.} = 0,1\sqrt{\frac{glc_{пит}(\rho_T - \rho_ж)}{500r_T\rho_ж}}. \quad (12)$$

В формулах (8)...(12):

$V_r, V_\phi, V_z$  – м/с;  $Q$  – производительность микроциклона по питанию, м<sup>3</sup>/ч;  $D, H_{ц}$  – диаметр и высота цилиндрической части, м;  $d_{пит}, d_{сл}, d_{шл}$  – диаметры питающего, сливного и шламового отверстий соответствующих патрубков, м;  $h_{сл}$  – высота заглибления сливного патрубка, м;  $\alpha$  – угол конусности конической части микроциклона, град;

$n = \frac{0,4d_{пит}^2}{d_{сл}^2} + 0,2$  – показатель степени;  $g$  – ускорение

свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $l$  – длина пути перемешивания с основным потоком некоторого объёма жидкости, движущейся в поперечном потоке направлении:  $l=1$  м;  $c_{пит}$  – концентрация взвешенных частиц в питании микроциклона, мг/л.

Решение системы уравнений (7) позволит определить координаты точек пространственной траектории движения частицы, а также время и составляющие скорости её выделения из вращающегося потока жидкости. Значения  $V_r, V_\phi, V_z$  и  $V_{в.п.}$  учитываются в процессе интегрирования системы уравнений (7). Наиболее распространенными методами численного интегрирования являются методы Эйлера, Адамса и Рунге-Кутты.

Учитывая, что основным недостатком метода Эйлера является невысокая точность, а метод Адамса требует знания приближённого решения в нескольких начальных точках сетки и не допускает изменения шага в процессе счёта, наиболее удобным для решения системы дифференциальных уравнений (7) является метод Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. При использовании данного метода в качестве приращения следует использовать промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого частица из положения с координатами  $r_n, \phi_n, Z_n$  перемещается в положение с координатами  $r_{n+1}, \phi_{n+1}, Z_{n+1}$ . Так как скорость потока жидкости на интервале  $\Delta t$  предполагается постоянной, значения её составляющих  $V_r, V_\phi$  и  $V_z$  принимаются для точки с координатами  $r_n, \phi_n, Z_n$ .

**2. Конструкции мультициклонов на базе единичных аппаратов.** На процесс разделения сложных жидких сред в единичном

циклонном аппарате влияют как технологические параметры (состав исходной сточной воды, давление питания на входе и т.п.), так и конструктивные параметры (диаметр цилиндрической части аппарата, размеры отверстий питающего, сливного и шламового патрубков, угол конусности конической части и противодействие на линии слива). Наибольший эффект разделения достигается в напорных циклонах с диаметром цилиндрической части  $D \leq 50$  мм. При давлении питания на входе в аппарат до 0,5 МПа эффект осветления загрязненной воды в микроциклоне составляет 70...75%.

Что касается производительности единичного микроциклона, то она невелика и составляет, например, для аппарата с диаметром  $D=30$  мм при давлении на входе 0,3 МПа всего лишь 1...1,2 м<sup>3</sup>/ч. С целью увеличения объемов обрабатываемых сред используют мультициклоны с определенным количеством единичных напорных микроциклонов (рис. 3). Мультициклон имеет общие для всех единичных напорных микроциклонов напорную, сливную и шламовую камеры. Устанавливаться мультициклон может вертикально, как показано на (рис. 3), или горизонтально, также наклонно.

Кроме одноступенчатой, в мультициклоне возможна многоступенчатая очистка (рис. 4), когда слив микроциклонов первой ступени является питанием для микроциклонов второй ступени. В то же время шлам для всех ступеней собирается в одной камере.

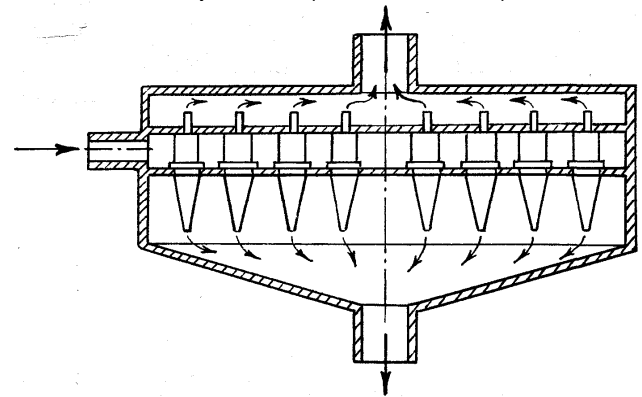


Рис. 3. Одноступенчатый мультициклон

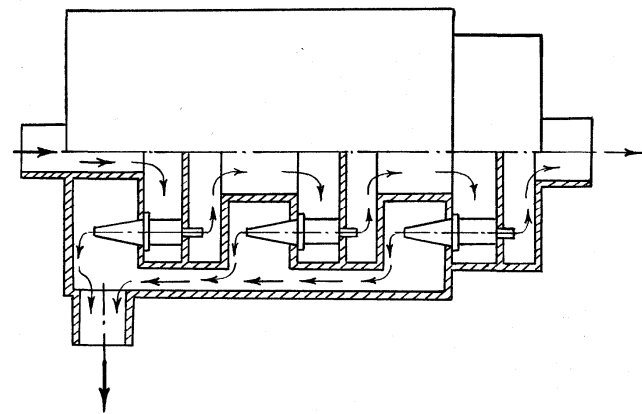
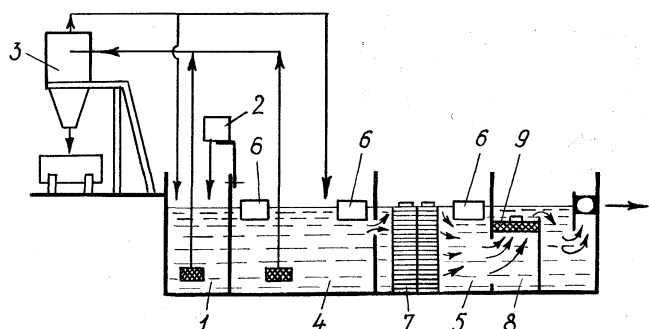


Рис. 4. Многоступенчатый мультициклон

**3. Схемы установки очистки шламовых вод автотранспортных предприятий с использованием мультициклонов.** Использование мультициклонов в схемах очистки сточных вод автотранспортного предприятия позволит упростить эти схемы. Существующая в настоящее время схема установки для комплексной очистки воды состоит из четырех ступеней очистки (рисунок 5). Загрязненная вода поступает в приемную камеру-песколовку 1, в которой происходит осаждение наиболее крупных частиц. В схеме предусмотрен дозатор 2, из которого в камеру подаются коагулянты (сернистый алюминий и т.п.). Коагулянты образуют с солями воды крупные хлопья, которые адсорбируют взвешенные частицы и выпадают с ними в осадок. Последний перекачивается в гидроциклон большого диа-

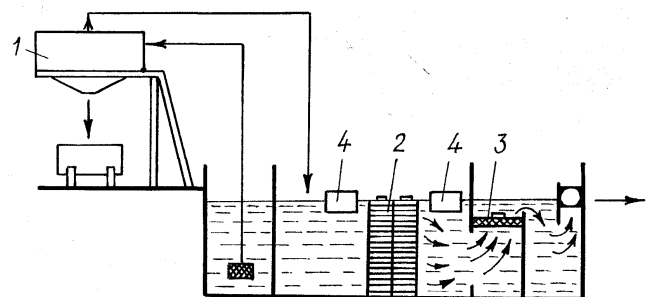
метра для удаления шлама и воды. Слив гидроциклона 3 подается в камеру 4 и частично в камеру 1. В камерах 4 и 5 смонтированы маслоуловители 6. В камере 5 смонтирован так же пластинчатый контейнер 7 для улавливания мелких частиц, ила и т.д. В последней камере 8 установлен фильтр тонкой очистки 9, пройдя через который, вода подается насосами в зону мойки.

Использование в схеме мультициклона 1 (рис. 6) позволяет сократить количество камер и отказаться в ряде случаев от коагулирования обрабатываемой жидкости. В данном случае слив мультициклона сразу поступает в камеру с пластинчатым контейнером 2 и, пройдя через его, так же как и ранее, окончательно подвергается осветлению в фильтре тонкой очистки 3, после которого поступает для повторного использования. В схеме на рисунке 6 также предусмотрены и маслоуловители 4.



1 – приемная камера; 2 – дозатор; 3 – единый гидроциклон; 4 – камера для слива осветленной воды гидроциклона; 5 – камера третьей ступени очистки; 6 – маслоотпливоуловитель; 7 – пластинчатый контейнер для улавливания мелких частиц и ила; 8 – камера четвертой ступени очистки; 9 – фильтр тонкой очистки

Рис. 5. Схема установки для комплексной очистки воды

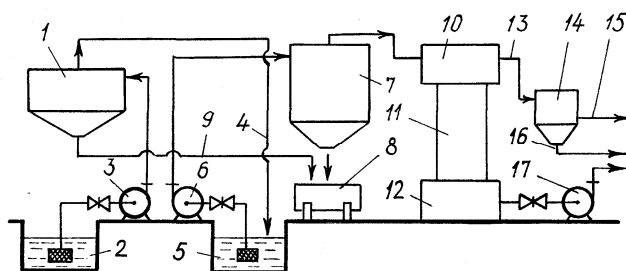


1 – мультициклон; 2 – пластинчатый контейнер; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – маслоотпливоуловитель

Рис. 6. Схема установки для очистки воды с использованием мультициклона

При использовании на автотранспортном предприятии установки «Кристалл» предполагается в качестве первой ступени очистки использование мультициклона 1 (рисунок 7), в который исходная вода подается из приемной камеры 2 посредством насоса 3. Слив осветленной воды из мультициклона поступает по трубопроводу 4 в камеру 5, из которой с помощью насоса 6 подается в виброфильтр 7.

Виброфильтр снабжен фильтрующей мелкой сеткой и кассетами с гранулами полистирола и очищается вибратором, а осадок периодически сливается в передвижной бункер 8. Сюда же по трубопроводу 9 поступает и шлам мультициклона 1. После виброфильтра вода поступает в камеру 10 с маслоотпливоуловителем, а затем в фильтр тонкой очистки 11 и далее собирается в сборнике 12. В блоки 10 и 11 подаются легковсплывающие вещества, предназначенные для налипания на них остатков ГСМ. Нефтепродукты из камеры 10 по трубопроводу 13 подаются в сборник 14 и по трубопроводу 15 в емкость для вывоза или сжигания на специальной установке. В нижней части сборника 14 предусмотрен патрубок 16 для слива воды, накапливаемой в сборнике. Из сборника 12 очищенная вода посредством насоса 17 поступает к моечным устройствам. Фильтрующие материалы, используемые в данной установке, очищаются от нефтепродуктов на специальной центрифуге.



1 – мультициклон; 2 – приемный резервуар для исходной воды; 3 – насос подачи питания в мультициклон; 4 – патрубок слива осветленной воды мультициклона; 5 – приемная камера для осветленной воды мультициклона; 6 – насос подачи воды в виброфильтр; 7 – виброфильтр; 8 – бункер-сборник осадка; 9 – патрубок подачи шлама мультициклона; 10, 11 – блоки очистки от нефтепродуктов; 12 – сборник очищенной воды; 13 – патрубок слива нефтепродуктов; 14 – сборник нефтепродуктов; 15 – патрубок слива ГСМ; 16 – патрубок слива воды; 17 – насос подачи чистой воды к моечным установкам

Рис. 7. Модернизированная схема установки типа «Кристалл»

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Найденко, В.В. Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах / В.В.Найденко. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. – 287с.
2. Поваров, А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках / А.И. Поваров. – М.: Недра, 1978. – 232с.
3. Кислов, Н.В. Гидроциклонное осветление воды / Н.В.Кислов, Ф.М. Санюкевич; под ред. М.А. Гатиха. – Мн.: Наука і тэхніка, 1990. – 128 с.
4. Громыко, О.В. Расчет собственных колебаний циклонных аппаратов / О.В. Громыко, Ф.М. Санюкевич // Вестник БрГТУ. – 2000. – № 4: Машиностроение, автоматизация, ЭВМ – С. 46–48.
5. Мультициклон: а.с. № 1428476 СССР, МКИ4 В 04 С 5/24 / Н.В. Кислов, О.И. Палий, Ф.М. Санюкевич, О.В. Громыко; Гомельский политехн. ин-т. № 3894331; заявл. 13.05.85; опубл. 07.10.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 37. – С. 28.

Материал поступил в редакцию 21.02.13

#### SANYUKEVICH F.M. Pressure head microcyclones and possibility of their use at the motor transportation enterprises

Article is devoted to research of operation of the pressure head hydroclone devices being one of the most effective devices, centrifugal fields using action for separation of various components of liquid. The model of separation of a firm phase of liquid in a curvilinear stream of a hydroclone is offered. Possible schemes of installations for purification of slurry waters of the motor transportation enterprises with use of multicyclones are considered.